

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER
CENTRE D'ADICPODOUME

Laboratoire de Géologie

R A P P O R T D E S T A G E

E R O S I O N E T T R A N S P O R T

par

B. BOULANGE

Septembre 1967

EROSION ET TRANSPORT

par

B. BOULANGE

Septembre 1967

T A B L E S D E S M A T I E R E S

I - Observations sur le ravineau expérimental de Tiassalé

1. Situation du ravineau
 - 1.1. Géographie et Géologie
 - 1.2. Pédologie
 - 1.3. Végétation
 - 1.4. PLuviométrie
2. Equipement de la Station et techniques d'observations
 - 2.1. Etude des pluies
 - 2.2. Ruissellement
 - 2.3. Appareils de mesure
3. Résultats pour les années 1965-1966
 - 3.1. Pluviométrie
 - 3.2. Bilan de l'érosion mécanique pour les années 1965-66
 - 3.3. Discussions des résultats
 - 3.3.1. Morphologie du sol
 - 3.3.2. Ruissellement
 - a) lame d'eau ruisselée
 - b) coefficient de ruissellement
 - 3.3.3. Erosion.
4. Résultats physico-chimiques
 - 4.1. Le pH
 - 4.1.1. Variations annuelles
 - 4.1.2. Variations en cours de crue
 - 4.2. La résistivité
 - 4.2.1. Variations annuelles
 - 4.2.2. Variations en cours de crue
 - 4.2.3. Relation pH - résistivité

- 4.3. Erosion chimique et transport en solution
 - 4.3.1. Résultats pour l'année 1965
 - 4.3.2. Relation résistivité - minéralisation
 - 4.3.3. Evolution de la charge soluble en cours de crue
 - 4.3.3.1. Charge soluble unitaire
 - 4.3.3.2. Variations des éléments
 - 4.3.4. Variations annuelles

CONCLUSION

II - Transport effectué par le Bandama

- 1. Situation générale du Bassin versant
 - 1.1. Situation géographique
 - 1.2. Aperçu géologique
 - 1.3. Végétation
 - 1.4. Climatologie
- 2. Processus d'observations et modalités de prélèvements
- 3. Régime hydrologique
 - 3.1. Station de Duibo
 - 3.2. Station de Bafecao
 - 3.3. Station de Zienoa
 - 3.4. Station de Tiassalé
- 4. Débit solide et érosion mécanique
 - 4.1. Résultats
 - 4.2. Variations de la turbidité
 - 4.3. Interprétation des résultats
- 5. Débit soluble et érosion chimique
 - 4.1. Résultats
 - 4.2. Variations des éléments

CONCLUSION.

Avant propos

Après avoir effectué ma première année de stage au Laboratoire de Géologie de la Faculté de Dijon sous la Direction de Monsieur le Professeur MANGIN je fus affecté dès Juillet 1966 à l'étude du couple érosion-sédimentation qu'il a entreprise en Côte d'Ivoire. Au cours de l'année écoulée j'ai continué les observations commencées en 1963 traitant

- de l'érosion sous forêt : station ravineau et station Amitioro sur le bassin versant expérimental de l'Amitioro

- du transport par le Bandama

- de la sédimentation en lagune.

L'objet de ce rapport sera, en regard des observations faites sur le ravineau expérimental de Tiassalé, d'exposer les résultats obtenus sur deux années (1965-1966) et d'essayer d'en dégager quelques idées quant à l'érosion sous forêt.

Dans une deuxième partie nous traiterons des transports effectués par le Bandama.

I - OBSERVATIONS SUR LE RAVINEAU EXPERIMENTAL DE TIASSALE.

1. Situation du ravineau

1.1. Géographie et Géologie.

Le ravineau expérimental a été placé sur le bassin versant de l'Amitioro (cf carte hors texte et figure 1) dont l'étude hydrologique était faite simultanément par le service Hydrologie de l'O.R.S.T.O.M..

Il se situe à 14 km de Tiassalé, 500 m en retrait de la route Tiassalé-Divo.

Son bassin versant couvre une superficie de 2 ha ; la longueur du ravineau est de 90 m, sa pente est faible : 1,2 %.

Il est situé entièrement sur les schistes de la grande formation schisteuse et arkosique du niveau du Birrimien flyschoidé de l'Est de la Côte d'Ivoire.

1.2. Pédologie

Le lever de la carte pédologique a été fait par P. de la Souchère, dans le cadre de l'étude générale du bassin versant de l'Amitioro. On peut relever les formations suivantes :

a) en tête du ravineau (90 m en amont du jaugeur) sol faiblement ferrallitique, jaune, sableux, fin, limoneux à pseudogley de profondeur.

0 à 5 cm : gris beige-humifère - sableux fin - matières organiques pas très bien mélangées à la matière minérale - taches blanches - enracinement très abondant.

5 à 25 cm : plus jaune-sableux fin - beaucoup moins de matières organiques - enracinement moyennement abondant.

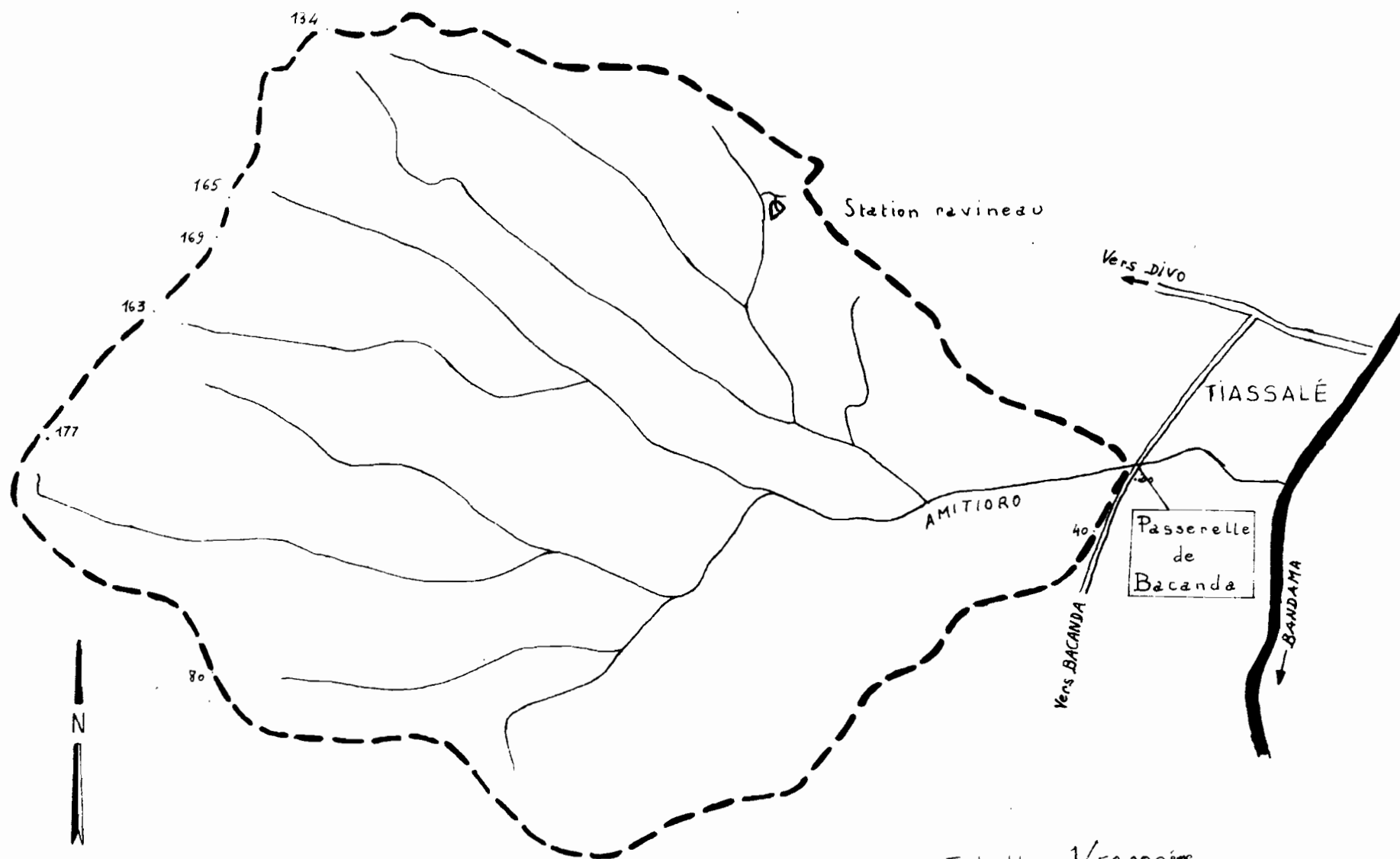
25 à 50 cm : horizon lessivé - beige très clair - passées blanches - sableux fin - friable à l'état humide compacte à l'état sec.

50 à 70 cm : horizon brutal - sablo-argileux - sableux fin légères taches diffuses plus foncées - assez compacte - structure polyédrique.

70 cm : tâches grises et ocres (horizon hydromorphe) apparition de quartz à 80 cm.

Figure 1

BASSIN EXPERIMENTAL DE L'AMITIORO



Echelle : 1/50 000 ^{cm}

b) 50 m en amont du jaugeur.

On retrouve les mêmes formations que précédemment mais l'horizon lessivé est moins net, plus épais, plus profond 60 à 65 cm.

c) 10 m en amont du jaugeur : sol hydromorphe temporaire de surface à pseudogley de profondeur caractéristique des bas fonds : on retrouve les mêmes formations de surface mais l'horizon lessivé est moins marqué : beige jaune humide sableux - fin.

40 - 50 cm : beige jaune - sableux fin - tâches blanchâtres et gris clair assez diffuses

50 cm : passage brutal à l'horizon hydromorphe - argilo-sableux - tâches rouilles bien individualisées.

Pour l'ensemble du ravineau on remarque que sous une faible litière de feuilles ce sol est un sol typique sur schistes (sableux fin) soumis à un certain lessivage vertical.

1.3. Végétation

La végétation est caractérisée par la forêt méso-phile à Celtis à tendance hygrophile. C'est une forêt à deux étages

- des arbres de 20 à 30 m, laissant entre leurs cimes des découverts assez importants.

- un sous bois d'assez forte densité d'arbustes de 5 m de haut.

Sur le sol, il n'y a pas de graminées, il est uniquement recouvert de branches et feuilles mortes.

1.4. Pluviométrie

La région de Tiassalé reçoit en moyenne 1323 mm de pluie par an.

La figure 2 donne la pluviométrie moyenne inter-annuelle pour 39 années de relevés à la Station de Tiassalé.

Cette région se rattache au climat équatorial de transition avec une première saison des pluies de Avril à Juin dont le maximum est en juin, une petite saison sèche Juillet Août à laquelle fait suite une deuxième saison des pluies de Septembre à Novembre plus faible que la précédente, le mois d'Octobre étant le plus pluvieux. La grande saison sèche de Novembre à Avril est souvent marquée par quelques jours de

STATION DE TIASSALE

VARIATION MENSUELLE DE LA PLUVIOMETRIE

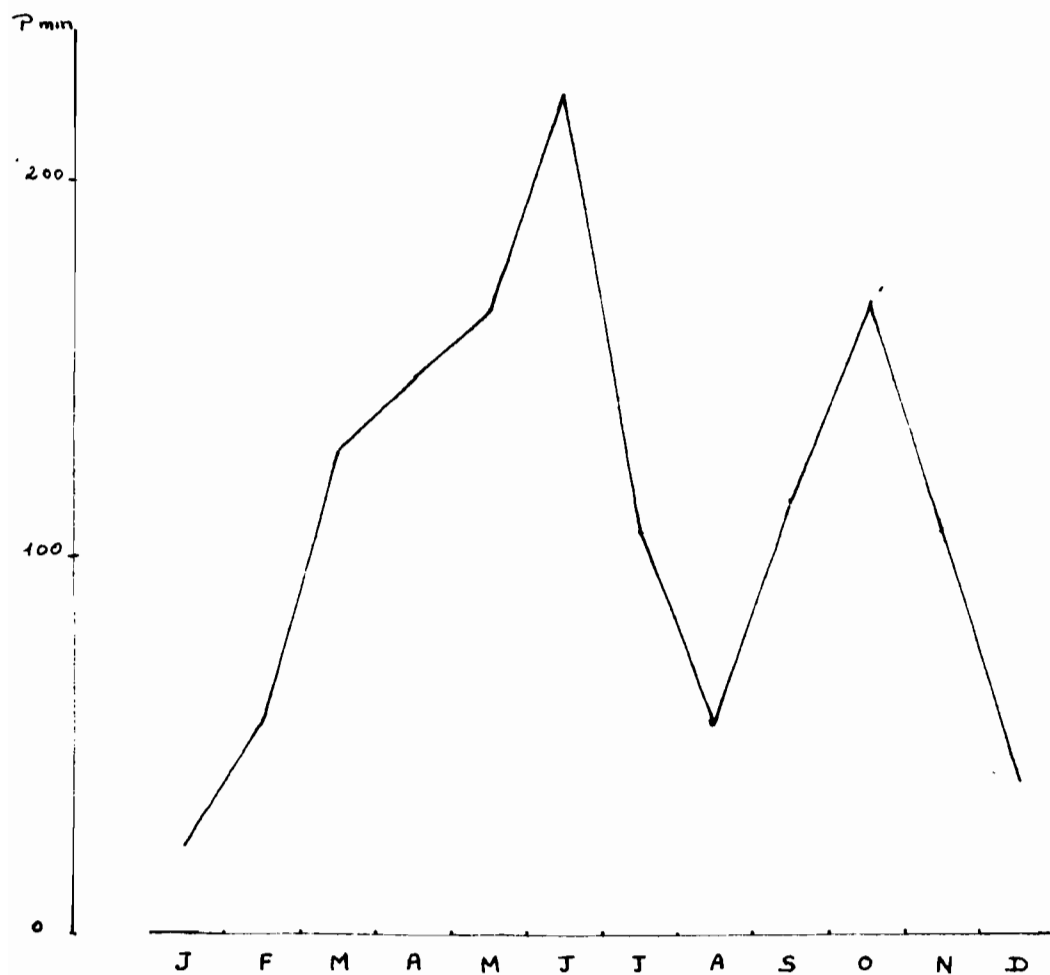


Figure 2.

2. Equipement de la station et techniques d'observations.

2.1. Etude des pluies

La station est équipée d'un pluviographe enregistreur journalier et de deux bacs à pluie en ascodur. L'un des bacs est à découvert l'autre est sous couvert forestier. Leur superficie de 3 m² permet de recueillir 3 l d'eau pour une chute de 1 mm de pluie. Pour chaque échantillon de pluie ainsi recueilli nous relevons l'heure, l'intensité de la pluie sera donné par le pluviographe et nous mesurons immédiatement les paramètres physico-chimiques : pH, redox, température, résistivité. En fonction de cette dernière certains échantillons sont conservés pour l'analyse chimique.

2.2. Ruissellement

A l'extrémité du ravineau sont placés : une cuve à sédimentation destinée à recueillir les sédiments transportés par charriage, un jaugeur Parschall constitué d'un canal d'écoulement gradué et en communication avec un limnigraphe enregistreur(OTT type X) et une deuxième cuve à sédimentation.

Les échantillons d'eau de ruissellement sont prélevés à l'entrée de la 1ère fosse de sédimentation dans un tube de 12 l. Pour chaque échantillon nous relevons l'heure, la hauteur à l'échelle et nous mesurons les paramètres physico-chimiques comme pour les échantillons de pluie. La totalité du prélèvement est conservé pour la détermination de la charge solide en suspension. En fonction de la résistivité certains échantillons sont envoyés aux Services Centraux de Bondy pour analyse chimique.

A l'issue d'une crue les sédiments contenus dans les fosses amont et aval sont recueillis en sac plastique et ramenés au laboratoire pour y être pesés et analysés : granulométrie, rapport carbone-azote, analyse minéralogique aux RX faite à Bondy.

2.3. Appareils de mesure.

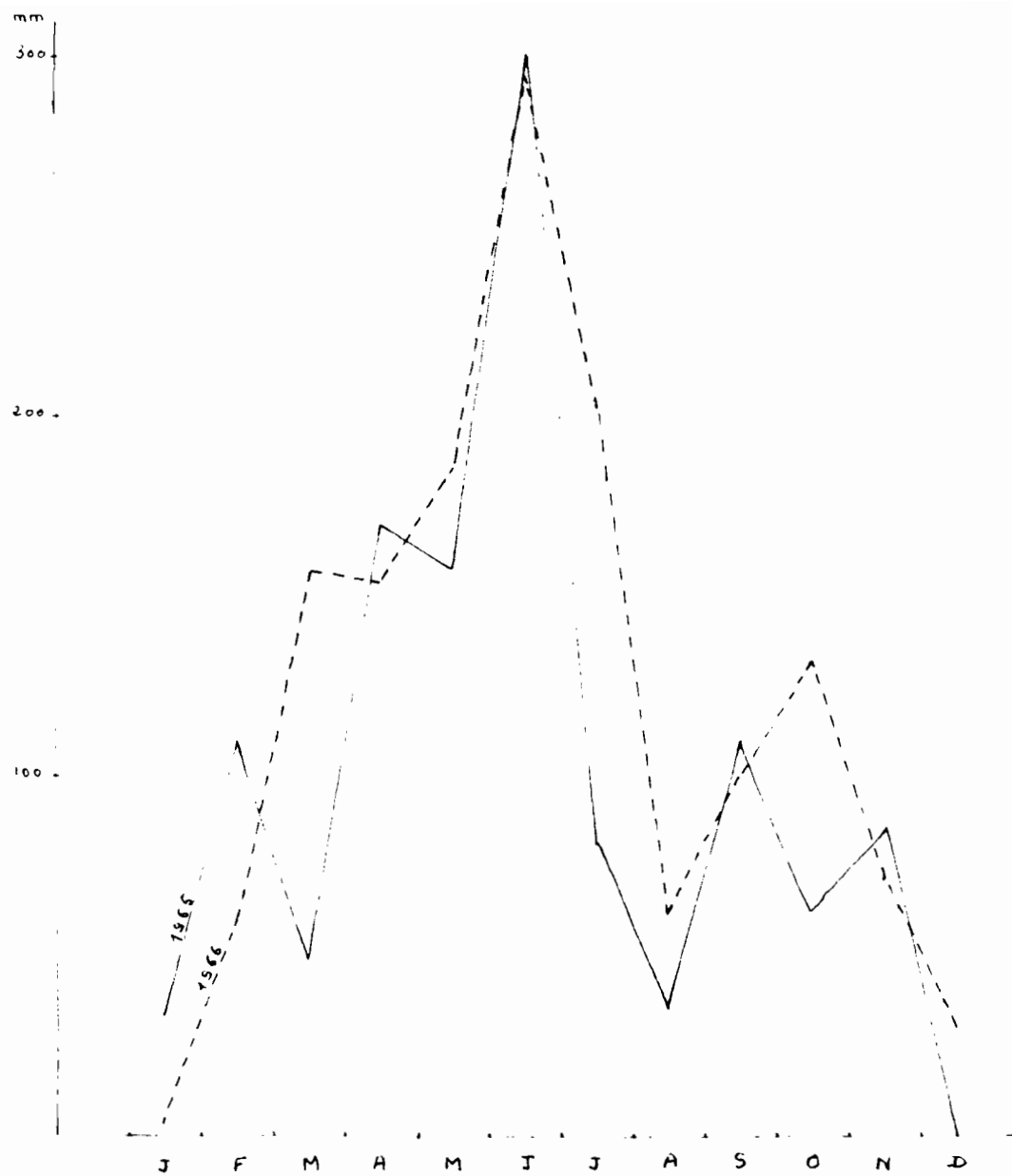
Nous disposons d'un pH mètre MECI, type VS2 (110 V) alimenté par batterie et convertisseur. Cet appareil permet la mesure du pH et du potentiel d'oxydo réduction par méthode potentiométrique.

- un conductivimètre MECI (type IP 31, pont de Kohlrausch) permettant de mesurer des résistivités comprises entre $30 \text{ ohms.cm}^2/\text{cm}$ et $1.10^6 \text{ ohms.cm}^2/\text{cm}$. Cet appareil est alimenté sous tension de 45 V

- au thermomètre MECI (type IP 41, pont de Wheatstouc).

Les sondes et électrodes afférentes à ces différents appareils y sont reliées par cable gainé. Elles sont fixées à l'extrémité d'une mandoline étanche :

- une électrode de platine pour les mesures de potentiels
- une électrode de verre pour les mesures de pH
- une sonde de coefficient 10 pour les mesures de résistivité (nous disposons également d'une sonde de coefficient 1 pour les faibles résistivités).
- un couple thermométrique pour les mesures de température.



STATION RAVINEAU

PLUVIOMETRIE MENSUELLE 1965 - 1966

Figure 3

3. Résultats pour les années 1965-1966.

3.1. Pluviométrie

Pour ces deux années les quantités de pluie tombées au ravineau sont notablement différentes

1965 : 1195 mm

1966 : 1554 mm

La figure 3 montre la répartition mensuelle des pluies pour chacune de ces deux années.

Le mois de Mars notamment a été beaucoup plus pluvieux en 1966. Déjà on peut prévoir l'importance que ces pluies du mois de Mars auront sur les ruissellements des mois suivants. Au début de la saison des pluies le sol sera plus imprégné d'eau qu'il ne l'était en 1965. Cette différence sera nettement mise en évidence dans un paragraphe ultérieur où nous parlerons du coefficient de ruissellement.

3.2. Bilan de l'érosion mécanique pour les années 1965-66.

Nous ne présentons dans les tableaux que les pluies ayant provoqué un ruissellement :

HP : hauteur de pluie en mm

VR : volume ruisselée en m³

LR : lame d'eau ruisselée en mm

R : coefficient de ruissellement $\frac{LR}{HP}$ en %

Q : débit maximum de la crue en l/sec

S : charge solide transportée en suspension en gr.

E : sédiments recueillis dans les fosses en grammes

E : S+C : charge solide totale enlevée au cours d'une crue en grammes

S/E : rapport $\frac{\text{charge en suspension}}{\text{charge totale}}$ en %

3.3. Discussions des résultats

Outre la nature du sol, la pente et l'importante couverture végétale déjà évoquée dans un paragraphe précédent, la morphologie du sol, le ruissellement, l'intensité de la pluie vont particulièrement influencer l'érosion.

TABLEAU I : 1965

DATE	HP mm	VR m ³	LR mm	R %	Q max. l/sec	S grammes	C grammes	E grammes	S/E %
12.2	64.6	92	4.6	7.1	7	1340	780	2120	63
29.4	38.0	4	0.2	0.5	1.4	200	70	270	74
30.4	25.0	23	1.15	4.6	5	1690	400	2090	81
25.5	28.0	1	0.05	0.2	0.4				
28.5	23.0	1	0.15	0.6	1.2	200	50	250	80
31.5	26.9	42	2.1	7.8	4	3080	590	3670	84
13.6	66.1	238	11.9	18	16.8	12670	1575	14245	89
17.6	29.5	84	4.2	14.2	4.6	7850	720	8570	91
19.6	39	216	10.7	27.3	13.8	17280	2060	40000	95
20.6	31.6	269	13.4	42.4	14.4	20660			
21.6	19.7	79	3.9	19.7	2.6	3800	660	4460	69
29.6	25.1	67	3.3	12.3	2.4	2880	600	3480	83
30.6	54.5	230	11.5	21.1	13.8	13280	1600	14880	89
11.7	47.2	186	9.3	19.8	10	15550	1320	16200	93
16.9	56.0	82	4.1	7.3	2	2950	490	3440	86
20.9	27.8								
21.9	25.0	83	4.1	16.4	4.4	4970	820	5790	86
2.11	37.0	50	2.5	6.7	4.4	2230	220	2550	88
Total	664	1750	87.5	13.5		110630	11955	122585	90.1

TABLEAU II : 1966

DATE	HP mm	VR m ³	LR mm	R %	Q max l/sec	S grammes	C grammes	E grammes	S/E %
9.4	70	190	9.5	13.5	11.6	7920	260	8180	96
11.4	23.2	39	1.9	8.1	3	1190	100	1290	92
18.4	43	298	14.9	13.9	12.6	15000	1300	16300	92
19.4	64								
13.5	52.4	149	7.4	14.1	12	9000	430	9430	95
16.5	21.8	57	2.8	12.8	2.8	2710	120	2830	95
4.6	25.8	33	1.6	6.2	2.2	1500	75	1575	95
14.6	71.5	212	10.6	14.8	18	13000	2000	30000	95
15.6	57.6	350	17.4	30.2	12	15000			
18.6	20.6	30	1.5	7.2	1.6	1000	100	1100	91
25.6	13.6	50	2.5	11.0	1.5	1700	150	1850	91
28.6	24.7	47	2.3	9.3	4.4	5400	510	5910	91
1.7	19	53	2.6	13.6	8	18940	2190	49690	95
2.7	34	329	16.4	48.2	30.8	28560			
27.7	26.5	33	1.6	6	6	2200	180	2380	92
4.10	51.5	227	11.3	21.9	12	25300	1150	26450	95
Total	619.2	2097	104.8	16.9		134920	8565	143485	94

3.3.1. Morphologie du sol

Une observation minutieuse des flancs et du tallweg du ravineau nous fait apparaître au milieu de la litière végétale des petits monticules de deux sortes

- les uns de quelques millimètres à un centimètre de haut sont très friables ; ils sont formés de petites boulettes (inférieures au mm). La densité de ces petits tas est forte mais ils sont bien individualisés.

Ce remaniement est dû à des organismes (fourmis ...)

- les autres appelés terricules, sont de taille plus importante : 5 à 10 cm de haut, en forme de chou-fleur. Ils sont constitués par de gros éléments : environ 2 cm de diamètre. Ces boules sont perforées à la base (ce petit conduit contient parfois des vers). Ils forment des agrégats plastiques et de couleur plus claire quand ils sont frais ; ils durcissent rapidement et prennent une couleur plus foncée.

Les feuilles mortes sont souvent recouvertes d'une légère couche de limons.

On ne relève pour ainsi dire aucune trace de ravinement.

La faible pente et la litière de branches et feuilles mortes protègent le sol contre le ravinement.

Par contre les monticules seront les premiers atteints par le ruissellement. Le sol ainsi remué par la microfaune sera l'élément de choix transporté par les eaux.

3.3.2. Ruissellement

Nous donnons dans le Tableau IV trois coefficients de ruissellement

- 1) coefficient annuel tenant compte de la totalité des pluies.

- 2) coefficient annuel tenant compte uniquement des pluies ayant provoqué un ruissellement

- 3) coefficient de ruissellement maximum

	HP mm	LR mm	R % mm	"	HP mm	LR mm	R % mm	"	HP mm	LR mm	R % mm
1965	1195	87.5	7.3	"	664	87.5	13.5	"	31.6	13.4	42.4
1966	1554	104.8	6.7	"	619	104.8	16.9	"	34	16.4	48.2

TABLEAU III

a) lame d'eau ruisselée

La quantité d'eau ruisselée en 1966 est supérieure à celle de 1965. Il est intéressant de noter que si les chutes de pluies sont plus importantes en 1966 c'est une quantité moindre de pluie (619 mm en 1966 pour 664 en 1965) qui a provoqué un ruissellement supérieur.

On constate une nette augmentation des pluies dans les classes 0 à 10, 10 à 20 et 20 à 30, petites pluies ne provoquant un ruissellement guère plus important en 1966 qu'en 1965 mais agissant fortement sur la saturation du sol.

b) Coefficient de ruissellement

Le coefficient annuel est sensiblement le même pour les années 1965 et 1966 : 7,3 % et 6,7 %. Il ne représente qu'une faible partie du bilan hydrique que l'on peut résumer par la formule.

$$P = D + R + ETP + df$$

ou D représente l'eau de drainage du sol

R représente le ruissellement

ETP représente l'eau perdue par évapotranspiration

df représente l'eau interceptée par les arbres.

Si on ne considère que les pluies ayant provoquées un ruissellement le coefficient de ruissellement est supérieur en 1966 (cf Tabl. III). Une pluviosité plus forte, une saturation plus importante du sol, une humidité plus grande de l'air et une évapotranspiration moins intense peuvent être cause de cette augmentation.

En cours d'année il ne semble pas y avoir une évolution particulière du ruissellement. Les plus forts coefficients correspondent aux mois de fortes pluies : Juin et Juillet : période durant laquelle on enregistre aussi les plus fortes crues.

Durant cette même période on atteint des coefficients maximum 42 et 48 % : coefficients élevés par rapport aux coefficients annuels. Là intervient l'influence des pluies précédentes comme nous le voyons pour les mois de Juin (cf. Tableau I et II).

3.3.3. Erosion

La majorité du transport solide se fait en suspension (cf. tableau I et II). La quantité de sédiments recueillie dans les fosses ne représentent qu'une fraction inférieure à 10 % de l'ensemble des sédiments transportés.

Sur l'ensemble des deux années l'érosion est assez faible : en 1965 nous avons 0,061 t/ha/an et en 1966 0,071 t/ha/an, pour une pente de 1,2 %.

Il ne semble pas exister de variations particulières de l'érosion au cours de l'année. Au plus fort débit correspondent les exportations les plus importantes.

Le rapport S/E est très élevé : 70 à 95 %. En 1965 on peut noter une certaine progression de ce rapport de la saison sèche à la saison des pluies, progression qui serait du uniquement à l'entraînement par les premières pluies du sol remanié par la microfaune (turricules); par contre en 1966 ce rapport n'accuse aucune variation particulière.

On peut dire que le charriage est très faible, le ravinement est pratiquement nulle. L'érosion est uniquement une érosion en nappe. Les matériaux fins sont détachés du sol par l'énergie cinétique des gouttes de pluies, énergie accrue du fait du couvert végétal, et entraînés en suspension.

CRUE DU 10 JUIN 1967

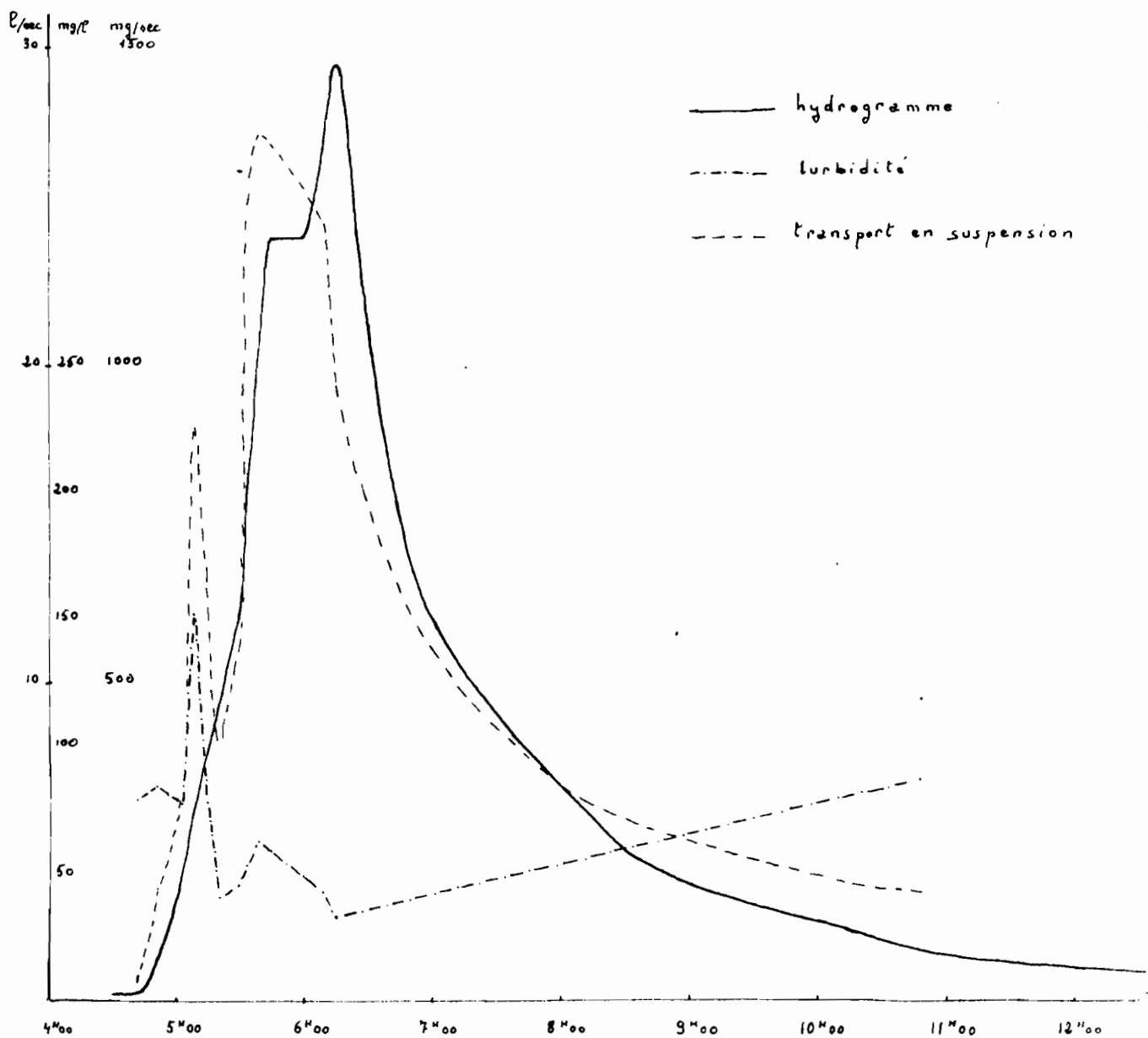


Figure 4

La turbidité croît rapidement en début de crue (figure 4) pour atteindre ensuite un minimum au maximum de crue. La plus grande quantité de matériel en suspension est évacuée avant le maximum de crue.

Le début du ruissellement est toujours la période la plus érosive : érosion résultant de l'entraînement rapide du sol remanié. Fréquemment en fin de crue on assiste à une remontée de la turbidité liée probablement à une baisse de débit les eaux d'écoulement conservant cependant une certaine compétence.

4. Résultats physico-chimiques

4.1. Le pH

4.1.1. Variations annuelles

Le pH des eaux de ruissellement ne varie pas en cours d'année. Les données recueillies durant les années 1965-1966 d'une manière franche donne pour le pH une valeur moyenne d'environ 6,5, sans variations majeures d'une crue sur l'autre.

Nous donnons dans le Tableau IV les valeurs extrêmes des pH relevées pour les différentes crues.

1965			1966		
Date	p H		Date	p H	
12.2	6.4	6.5	9.4	6	6.1
29.4		6.8	11.4	5.9	6.0
30.4	6.4	6.7	14.6	6	6.5
28.5		6.8	15.6	5	7.9
31.5	6.3	6.8	25.6		6.3
13.6	6.5	7.0	28.6	6.2	6.5
17.6	6.3	6.5	1.2.7	6.3	7.1
19.20.6	6.4	6.6	5.7	6.3	6.6
29.6	6.1	6.3	17.7		7.7
30.6	6.1	6.5	3.10	6.0	6.3
11.7	6.1	6.3			
16.9	6.5	6.6			
20.9		6.7			
21.9	6.1	6.3			
2.11	6.9	7.0			

TABLEAU IV

4.1.2. Variations en cours de crue (cf. fig. 5)

On relève pour les fortes crues de sensibles variations du pH. Il apparait une augmentation de celui-ci au cours de la montée de crue puis une chute durant la décrue.

Ces variations seraient liées à la présence de matières organiques. Moins le ruissellement est intense plus les eaux sont en contact avec l'humus du sol d'où une baisse du pH que l'on relève en début et en fin de crue.

Durant la pointe de crue, le ruissellement intense ne permet guère d'échange entre le sol et l'eau, d'où une augmentation du pH.

4.2. La résistivité

4.2.1. Variations annuelles

Nous avons relevés dans le tableau V les résistivités extrêmes mesurées au cours des différentes crues.

1965			1966		
Date	Résistivité ohms cm ² /cm		Date	Résistivité ohms. cm ² /cm	
12.2	9500	17700	99.4	8400	25200
29.4		31200	11.4	15600	23000
30.4	14900	27600	13.5	7400	25600
28.5		24000	15.5	17200	21400
31.5	17500	22800	5.6	28000	36300
13.6	18900	25500	14.6	18300	22200
17.6	20200	23300	15.6	18900	29200
19-20.6	17300	24000	25.6		29000
29.6	18700	25900	28.6	19900	26800
30.6.	21000	25000	12.7	17900	32500
11.7	22500	27600	5.7	13000	17900
16.9	19000	28000	17.7	16400	
20.9	17300		3.10	19200	32200
21.9	18800	25400			
2.11	25200	39100			

TABLEAU V

Aucune variation majeure de la résistivité ne semble intervenir en cours d'année. Les valeurs se répartissent entre 15.000 et 30.000 ohms cm²/cm.

CRUE DU 27 JUIN 1966

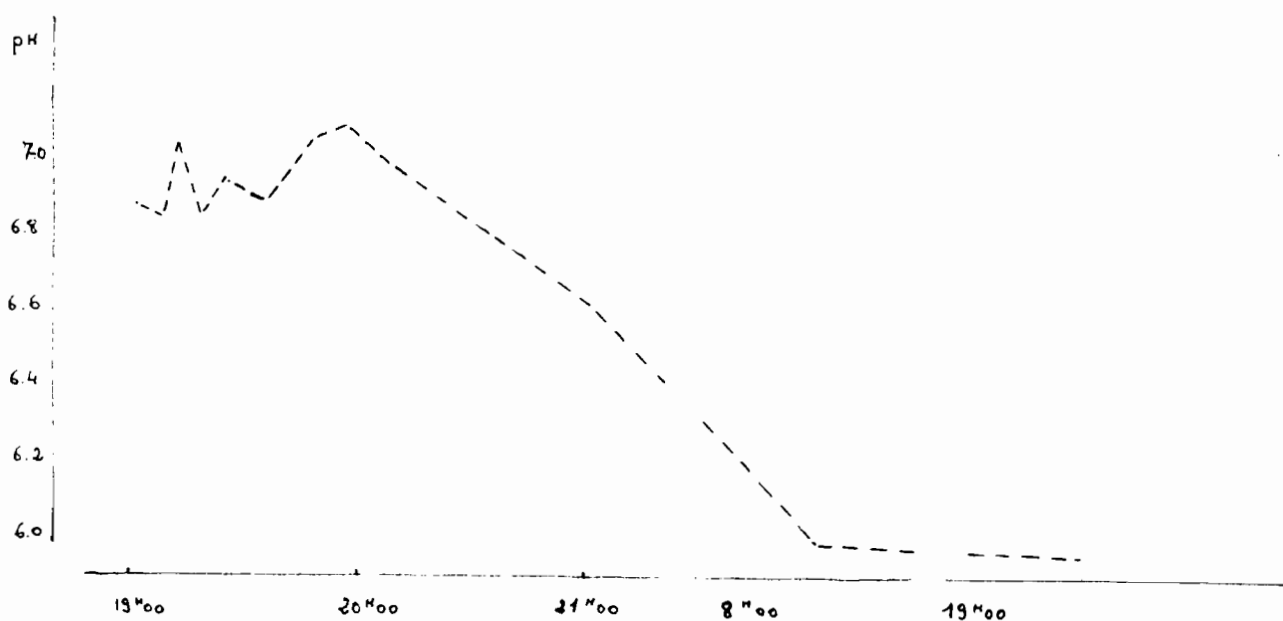


Figure 5 : Variation du pH.

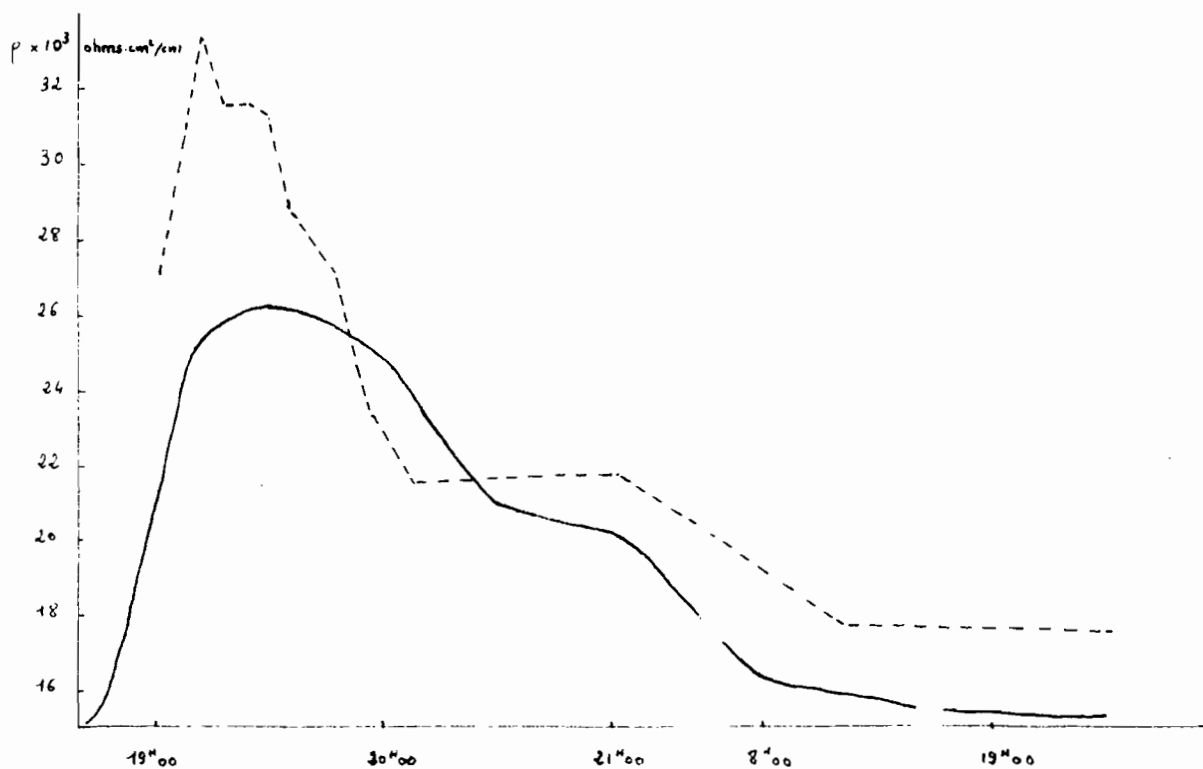


Figure 6 : Variation de la resistivité (— hydrogramme)

4.2.2. Variations en cours de crue (cf. fig. 6)

La résistivité augmente en début de crue pour atteindre une valeur maximale avant le maximum de crue puis elle décroît progressivement jusqu'en fin de crue.

Deux facteurs interviennent dans ces variations

- le premier est l'intensité du ruissellement. Les montées de crue sont très souvent rapides
- le deuxième est un facteur distance : en ce sens que les premières eaux ruisselées passant à l'exutoire ont parcouru une très faible distance et n'ont guère eu le temps de se charger en produit soluble.

La brusque chute de la résistivité au maximum de crue doit être liée à l'arrivée des eaux ayant ruisselé à l'extrémité amont du bassin. Puis on assiste à une certaine stabilisation suivie d'une nouvelle chute de la résistivité qui doit plutôt être liée à la baisse d'intensité du ruissellement.

4.2.3. Relations pH - résistivité

Si, de prime abord, pH et résistivité suivent des courbes de variations sensiblement identiques l'ensemble des mesures faites sur les échantillons ne révèle aucune relation directe entre ces deux paramètres ceci nous confirmerait l'influence des acides organiques sur le pH.

4.3. Minéralisation de l'eau et transport en solution.

Pour chaque crue 3 ou 4 prélèvements répartis en début maximum et fin de crue ont été soumis à l'analyse chimique

Sur chaque prélèvement l'analyse porte sur les éléments suivants :
 anions Cl - SO₄ - PO₄ - SiO₂
 cations K - Na - Ca - Mg.

Ces analyses sont effectuées dans les laboratoires Centraux de l'O.R.S.T.C.M. à Bondy.

4.3.1. Résultats de l'érosion chimique pour l'année 1965

Dans le tableau VI nous donnons le bilan chimique du ravineau de Tiassalé pour l'année 1965. Nous ne mentionnons que deux anions SO_4 et SiO_2 . Les quantités de phosphates (PO_4) sont très faibles de l'ordre de 0,5 mg/l, quant au chlore les méthodes de dosage ne permettent pas d'obtenir des valeurs inférieures à 5 mg/l.

Nous tenons compte cependant de ces deux résultats pour calculer la charge soluble unitaire et l'érosion chimique sur le bassin.

Les exportations sont calculées à partir de la moyenne des 3 ou 4 prélèvements effectués en cours de crue.

Ne possédant pas de résultats pour deux crues (21.6 et 21.9) nous avons essayé à partir des résistivités de rétablir approximativement les données chimiques.

Le bilan de l'érosion chimique pour l'année peut se résumer en kg/ha/an

Exportation totale	36
SO_4	3,4
SiO_2	16
K	2,9
Na	1,3
Ca	5,3
Mg	2,3

La silice représente à peu près 50 % de l'exportation totale, les bases en représentent 30 %.

Parmi les bases le Calcium^{est} l'élément le mieux représenté ; le Sodium semble beaucoup plus stable.

Le bilan total du ravineau se solde donc par une perte total d'environ 100 kg/ha/an.

DATE	VR m ³	SO ₄	SiO ₂	K	Na	Ca	Mg	Ch. so- luble unitaire	TOTAL
12.2	92	760	750	800	130	470	290	40.32	3710
29.4	4	10	30	20	0	10	0	22.41	90
30.4	23	120	290	120	20	110	60	35.20	800
25.5	1								
28.5	3	10	40	20	0	20	10	38.47	120
31.5	42	200	790	160	40	240	120	42.54	1790
13.6	238	840	3900	900	310	1760	650	43.23	10290
17.6	84	370	1770	190	100	560	240	44.22	3710
19-20.6	485	1600	9800	1390	1100	3550	1460	46.21	22410
21.6	78	(350)	(1750)	(150)	(100)	(550)	(200)	(42)	(3300)
29.6	67	230	1280	130	140	390	160	41.69	2790
30.6	230	730	4650	490	250	1420	570	41.10	9450
11.7	186	720	5920	430	190	920	450	51.87	9650
16.9	82	340	400	360	60	260	150	22.44	1840
20.9	Faible							24.50	
21.9	83	(340)	(400)	(360)	(60)	(260)	(150)	(22.44)	(1840)
2.11	50	190	310	150	30	160	90	23.78	1190
TOTAL	1750	6810	32080	5670	2530	10680	4600		72980

TABLEAU VI

Bilan de l'érosion chimique pour le ravineau (1965)
(les chiffres sont donnés en grammes).

4.3.2. Relation résistivité minéralisation.

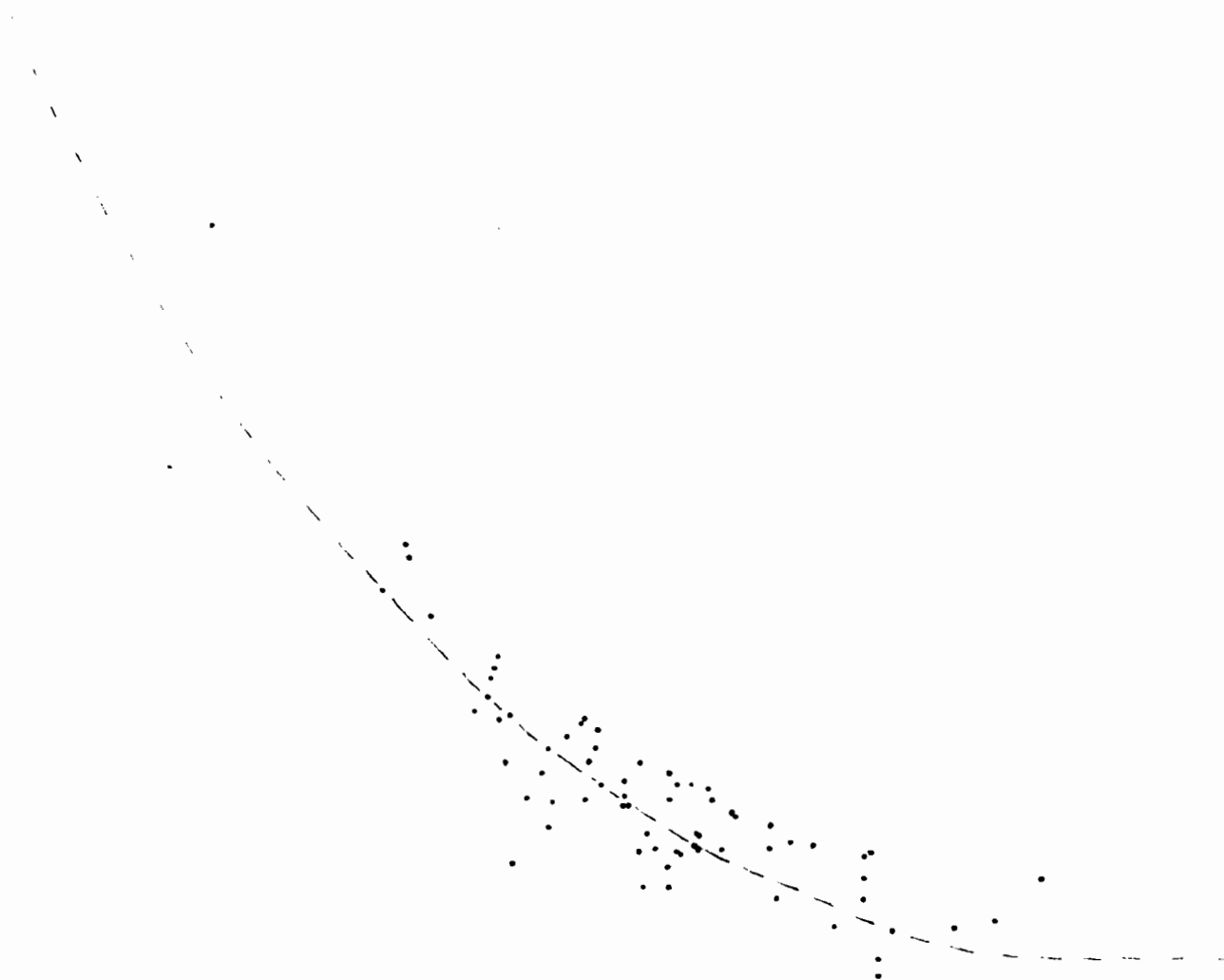
La totalité des anions n'étant pas mesurée il est difficile d'obtenir une équivalence ionique parfaite entre anions et cations. Si on ne considère que les cations K, Na, Ca et Mg les points de leur somme (mg/l) se resserrent assez bien le long d'une courbe tracée en fonction de la résistivité (cf. fig. 7).

Il n'apparaît cependant pas qu'à une résistivité donnée correspondent un certain pourcentage de chaque élément.

RAVINEAU DE TIASSALE 1965

Relation résistivité cations (K, Na, Ca, Mg)

Figure 7



5

10

15

20

25

30

$10^3 \text{ ohms-cm}^2/\text{cm}$

4.3.3. Evolution de la charge soluble

4.3.3.1. Charge soluble unitaire

Elle suit en général les variations de résistivité et augmente assez régulièrement du début à la fin de la crue.

Ceci tient essentiellement à la distance parcourue par les eaux ruisselantes et à la baisse d'intensité au moment de la décrue (cf. tableau VI).

En début de crue la charge soluble unitaire de 25 à 30 mg/l peut atteindre 50 à 60 mg/l en fin de crue.

4.3.3.2. Variations des éléments

- le chlore : des valeurs élevées 5 à 10 mg/l sont presque toujours observées en fin de crue.
- les sulfates (SO_4) : ils passent par un minimum lors du maximum de crue.
- les phosphates (PO_4) : ils varient assez peu mais paraissent cependant indiqués une progression constante.
- la silice (SiO_2) : sa variation est la plus nette, elle est marquée par une progression régulière du début en fin de crue.

Elle peut varier de 3 à 40 mg/l.

Les bases fortes (K. Na. Ca. Mg) ont tendance à marquer une chute au maximum de crue, sauf le Ca qui semble soumis à une augmentation régulière.

4.3.4. Variations annuelles

Les graphiques des figures 8 et 9 ont été dressés à l'aide des moyennes des prélèvements de chaque crue.

Les sulfates apparaissent en quantité moindre en fin de saison des pluies. Ce qui peut s'expliquer par un lessivage en cours d'année des matières organiques en décomposition.

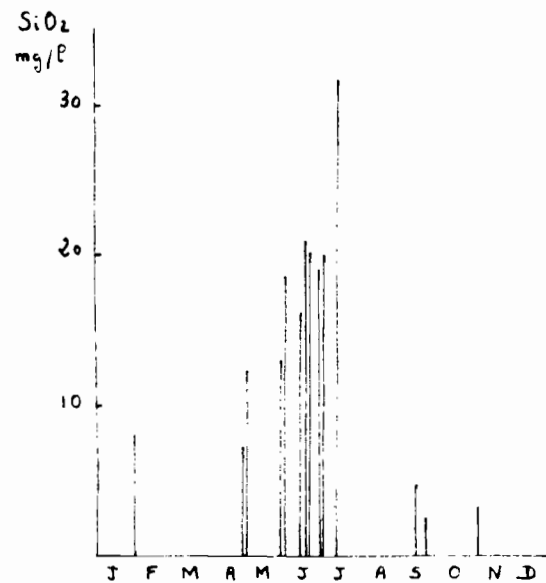
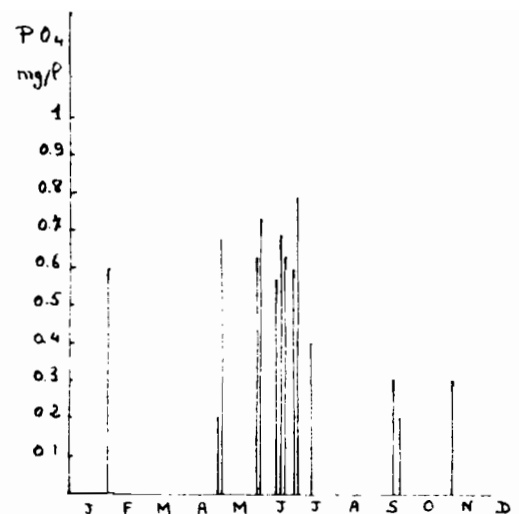
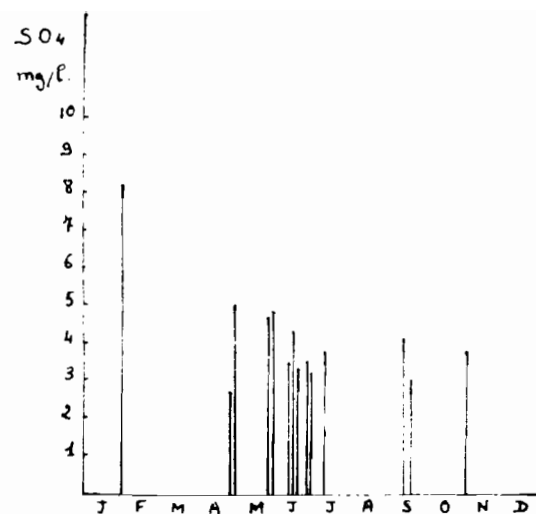
Les phosphates en moyenne 0,5 mg/l ne semblent soumis à aucune variation particulière.

La silice marque un accroissement net au cours de la saison des pluies. Résultat de l'altération des silicates la silice est le dernier élément à être dissocié.

Le potassium indique une baisse durant les mois les plus pluvieux alors que le calcium est en nette augmentation.

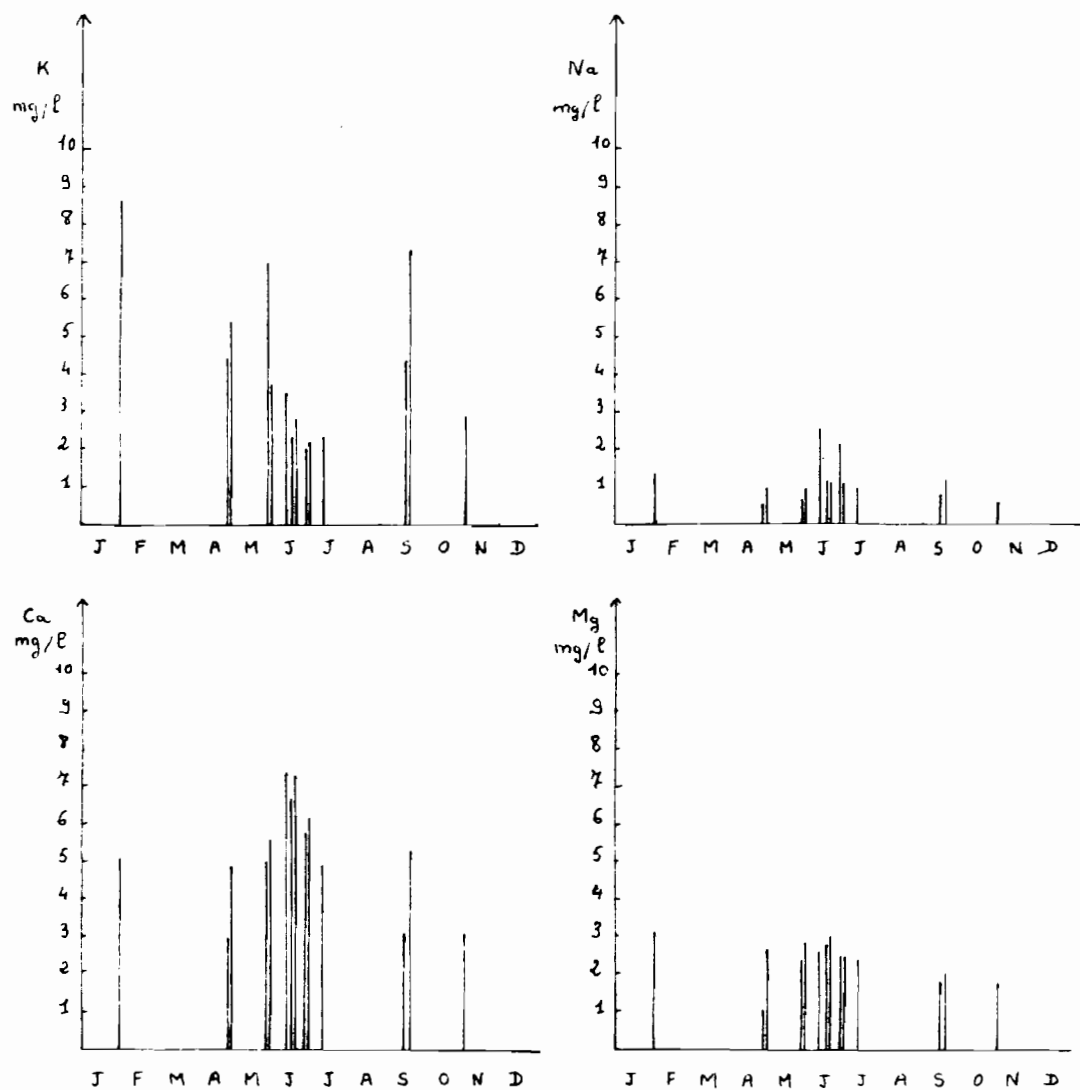
Sodium et magnesium varient assez peu.

Les résultats précédents laissent apparaître un ordre de migration des éléments : potassium, calcium et silice avec des proportions à peu près constantes de sodium et de magnésium.



RAVINEAU DE TIASSALE 1965
Variations des éléments solubles

Figure 8



RAVINEAU DE TIASSALE 1965 Variations des éléments solubles

Figure 9.

CONCLUSION

Ce bilan d'érosion hydrique pour les années 1965 et 1966, nous fait apparaître la faiblesse de l'érosion sous forêt (0,1 t/ha/an) : faiblesse due non seulement à la pente (1,2 %) mais aussi à l'importante couverture végétale. Dans ces conditions il serait possible de considérer la période actuelle comme soumise à une phase biostatique tel qu'elle est définie par ERHART.

Il est intéressant de rapprocher ces résultats de ceux obtenus par E. ROOSE sur parcelles expérimentales : alors que sous forêt sur pente de 22 % l'érosion est faible (0,2 t/ha/an) sur sol nu à pente 7 % le bilan est de 120 t/ha/an pour une pluviosité annuelle de 2000 mm.

Le coefficient de ruissellement peut atteindre 30 % sur sol nu, soit 4 à 5 fois plus que les résultats obtenus sous forêt.

II - TRANSPORT EFFECTUE PAR LE BANDAMA

1. Situation générale du Bassin Versant.

1.1. Situation géographique (cf. carte hors texte)

Le bassin versant du Bandama est compris entre 4° et 7° de longitude Ouest et entre 5° et 10° de latitude Nord. Sa superficie aux différentes stations d'observations est donnée dans le tableau VII.

Station	Superficie en km ²
Bandama DUIBO	92 200
Bandama BRIMBO	60 300
N'Zi à ZIENOA	33 150
Bandama TIIASSALE	94 250
Bandama Grand-Lahou	97 000

TABLEAU VII.

Sa longueur totale est d'environ 1050 km. Il reçoit pour principaux affluents la Marahoué en aval de Duibo et le N'Zi en amont de Tiassalé.

L'altitude moyenne du bassin est de 200 à 300 m. Le Bandama prend sa source entre Korhogo et Boundiali à une altitude de 400 m. Le point culminant du bassin (810 m) se trouve au Sud-Ouest de Boundiali dans le massif du Tangué.

L'hypsométrie se décompose comme suit :

- 1 % du bassin compris entre 810 m et 600 m d'altitude
- 42 % du bassin compris entre 600 m et 300 m d'altitude
- 30 % du bassin compris entre 300 m et 200 m d'altitude
- 20 % du bassin compris entre 200 m et 100 m d'altitude
- 7 % du bassin compris entre 100 m et 0 m d'altitude.

1.2. Aperçu géologique

Le Bandama ne draine presque exclusivement que des terrains Précambrien :

a) sédiments schisteux, manganésifères et quartzitiques ainsi que les laves du complexe volcano sédimentaire du Birrimien.

b) formations schisteuses, quartzitiques, conglomératique du flysch éburnéen du Birrimien.

c) granites syntéctoniques alcalins et calco-alcalins qui couvrent la majeure partie du bassin.

1.3. Végétation

Trois grands types de végétations sont représentés sur le bassin

a) la savane s'étend au Nord d'une ligne Korhogo - Boundiali.

Elle est à prédominance de graminées. Les thalwegs sont en général boisés. Les cultures (coton, mil, arachides) ont une densité très variable

b) la savane boisée couvre la majeure partie du bassin depuis la ligne Korhogo Boundiali jusqu'au "V Baoule limité au Sud par une ligne Séguéla - Brimbo - Dimbokro.

c) la forêt occupe le Sud du bassin. C'est une forêt secondaire à celtis de type mésophile. Des défrichements importants sont faits au profit de plantations (café, cacao, banane, ananas).

1.4. Climatologie

On peut distinguer trois régimes différents :

a) un régime tropical de transition au Nord du 9° N. La pluviométrie annuelle est de 1250 mm. Une grande saison de pluies se répartit sur les mois de juillet à septembre. La saison sèche s'étend de novembre à avril

b) un régime équatorial de transition atténué : c'est le régime du V Baouléen. La pluviométrie annuelle varie de 1400 à 1150 mm; elle est répartie en une première saison des pluies de Mai à juin, et une seconde saison des pluies plus importantes que la première de septembre à octobre.

Entre ces deux saisons des pluies une saison moins pluvieuse s'étend de juillet à août. La saison sèche est nettement marquée de novembre à février.

c) un régime équatorial de transition au Sud de Toumodi.

La pluviométrie varie de 1900 à 1400 mm et se répartit sur deux saisons : la première d'avril à juillet **est la plus** importante, elle est séparée de la deuxième saison des pluies (septembre à novembre) par une petite saison sèche de juillet à septembre. La grande saison sèche s'étend de décembre à mars.

2. Processus d'observations et modalités de prélèvements.

Trois stations ont été choisies sur le Bandama :

- station de Duibo sur le Bandama blanc ; le bassin versant est couvert jusqu'à cette station par la savane et une partie de la savane boisée. Le climat y correspond au premier type décrit : régime tropical de transition.
- station de Brimbo Bafécao : cette station est située en aval du confluent Bandama Blanc - Marahoué.

Elle intègre la quasi totalité de la savane boisée et les deux premiers types de climats.

- station de Zienoa sur le N'Zi nous permettant de recueillir les données de cet affluent drainant une zone de savane boisée et une zone de forêt et dont le bassin versant est en majeure partie sur les schistes.

Le régime climatique est du type équatorial de transition atténué.

- station de Tiassalé sur le Bandama : cette station intègre la quasi totalité des données du bassin versant.

Chaque station fait l'objet d'une série d'observations et de prélèvements mensuels. Les paramètres physico-chimiques sont mesurés suivant trois verticales à l'aide de l'unité manuelle décrite ci-dessus. Sur chaque verticale des mesures sont faites à 0,50 m de la surface et à 0,50 m du fond. Des prélèvements d'eau (10 l pour calcul de la charge solide en suspension, 2 l pour l'analyse chimique) sont effectués aux mêmes points. L'appareil à prélèvement d'une contenance de 12 l est une cage munie d'un système de fermeture automatique. Elle est lestée par un saumon auquel s'adjoint un moulinet pour la mesure du courant.

Aux mêmes verticales des échantillons de fond sont prélevés au moyen d'un shipek. Ces échantillons sont soumis à l'analyse granulométrique.

3. Régime hydrologique

3.1. A la station de Duibo l'hydrogramme de crue ne présente qu'un seul maximum en octobre. Les débits ont variés en 1965 de $10 \text{ m}^3/\text{sec}$ en saison sèche à $930 \text{ m}^3/\text{sec}$ en période de crue (figure 10).

3.2. A la station de Bafecao une petite crue précède la grande crue du mois d'octobre. Les débits ont variés de $15 \text{ m}^3/\text{sec}$ à $1600 \text{ m}^3/\text{sec}$ (figure 11).

3.3. A la station de Zienoa sur le N°Zi : on observe nettement les deux saisons de pluie qui se traduisent par une montée de crue en juin-juillet et une montée de crue en septembre-octobre. Presque nul durant la saison sèche le débit ne dépasse guère $400 \text{ m}^3/\text{sec}$ en saison des pluies (figure 12).

3.4. A la station de Tiassalé : on a pu observer en 1964 et 1965 deux pointes de crues nettement séparées : une petite crue en juin, juillet et une grosse crue en septembre-octobre. La coupure entre les deux saisons est moins nette pour l'année 1965 dont nous reproduisons les hydrogrammes. Les variations de débit sont importantes de $5 \text{ m}^3/\text{sec}$ à $2500 \text{ m}^3/\text{sec}$ en 1964 (figure 13).

3. Débit solide et érosion mécanique.

4.1. Résultats

Nous donnons dans le Tableau VIII les résultats du transport solide en suspension au cours des années 1964 - 1965 1966.

STATIONS	Superficie du B.V. en km ²	Année	Débits en m ³ /sec			Charge solide kg/sec		Charge solide totale t/an	Taux Erosion t/km ² /an
			Crue	Etiage	Module	Crue	Etiage		
BANDAMA DUIBO	32 200	1964							
		1965	930	10		60	0.5	562 200	17,4
		1966	630	5		100	0.5	652 700	20,3
BANDAMA BAFECAO	59 500	1964	2110	10		110	0.5	886 600	14,9
		1965	1600	15		80	1.5	751 700	12,6
		1966	1270	8		150	0.5	860 200	14,4
N'ZI ZIENOA	33 150	1964	425	1		45	0	384 500	11,6
		1965	360	10		60	0	448 300	13,5
		1966	410	1		55	0	395 800	11,9
BANDAMA TIASSALE	94 250	1964	2500	5	486	130	1	1 392 000	14,7
		1965	1860	20	436	140	2	1 145 000	12,1
		1966	1540	10	373	210	0.5	972 000	10,3

4.2. Variations de la turbidité (cf. figure 10-12-13).

La turbidité augmente très rapidement avant le maximum de crue. Elle est maximum le plus souvent lors de la première montée de crue. La presque totalité des éléments en suspension se trouve donc emmenée durant les mois de juillet et août.

Pour les différentes stations cette turbidité peut passer de 10 à 190-200 mg/l en quelques semaines. Au cours de la décrue la turbidité baisse rapidement.

Ce phénomène met bien en évidence le pouvoir érosif important des premiers ruissellements qui entraînent une grande partie des matériaux meubles. Les mêmes observations sont faites sur les bassins et ravineaux expérimentaux à savoir que les débuts de ruissellements sont les plus érosifs.

On note parfois une légère remontée de la turbidité en cours de décrue (station de Duibo, de Bafecao), remontée observée également sur les bassins et ravineaux expérimentaux. Ce phénomène peut être lié à la chute rapide du débit un certain pouvoir érosif et une compétence suffisante étant conservés ou à l'érosion des berges rendues moins résistantes par suite de la crue, ou à l'écoulement des flaques et retenues d'eau formées en cours de saison des pluies.

3.3. Interprétation des résultats

Pour l'ensemble du bassin versant on assiste à une nette diminution des débits de 1964 à 1966. La turbidité semble augmenter d'une année sur l'autre en période de crue donnant ainsi une indication sur la pluviométrie : moins de pluies ruisselantes en 1966 mais des pluies de plus forte intensité qu'en 1964.

Plus que le transport total le taux d'érosion annuel rend compte de l'influence de chaque partie du bassin sur le processus d'ensemble.

Le taux d'érosion est le plus élevé à la station de Duibo (20 t/km²/an) : le Bandama coule dans une région de savane, à couverture végétale faible. La saison des pluies est concentrée sur trois mois de l'année durant lesquels le ruissellement est intense.

A la station de Bafecao le taux d'érosion tombe à 13 t/km²/an. Le principal affluent reçu est la Marahoué. Il convient d'admettre que l'érosion est moins importante sur le bassin de la Marahoué que sur le cours amont du Bandama. Deux causes interviennent :

- la végétation est essentiellement une savane boisée
- la roche mère granitique affleure en de nombreux endroits du bassin et offre une proie moins facile à l'érosion que les schistes et l'épaisse cuirasse latéritique du haut cours du Bandama.

Pour le N°Zi le taux d'érosion est faible 12 t/km²/an. Ce taux se rapproche fortement de celui observé pour le ravinement expérimental de Tiassalé (7 t/km²/an). Le bassin versant du N°Zi comprend une grande partie de la zone schisteuse située à l'Est de la Côte d'Ivoire couverte d'une végétation dense forestière.

La station de Tiassalé intègre les données de la presque totalité du bassin (94.250 km² pour une superficie totale de 97.000 km²). Le taux d'érosion pour l'ensemble du bassin est assez faible (12 t/km²/an) et se rapproche de celui obtenu sous forêt. Il est probable qu'intervient une diminution de compétence du fleuve dans son cours inférieur.

4. Débit soluble et érosion chimique

4.1. Résultats.

L'importance quantitative et qualitative des analyses chimiques nécessite un très long travail de dépouillement et d'interprétation. Celui-ci est en cours de réalisation, complété au fur et à mesure de l'obtention des résultats.

Malgré les écarts considérables de débit la charge soluble unitaire ne marque que peu de variations oscillant le plus souvent entre 35 et 45 mg/l. Ceci représente pour 1965 à Tiassalé une exportation totale en solution de 550.000 t soit environ 6 t/km²/an.

L'exportation de produits en solution est principalement liée au débit. Contrairement à la charge solide le maximum d'exportation se place au maximum de crue. La charge soluble unitaire est souvent un peu plus élevée en début de crue, augmentation due à un accroissement important du taux de silice à cette période.

4.2. Variations des éléments

(la silice : elle représente environ 50 % de la charge soluble totale (15 à 50 mg/l). Elle passe par un minimum durant l'étiage pour atteindre son maximum en début de crue.

- à l'inverse les bases fortes K, Na, Ca, Mg en proportion à peu près constante passe par un maximum en période d'étiage :

potassium	: 1.5 à 4 mg/l
sodium	: 4 à 7 mg/l
calcium	: 3 à 8 mg/l
magnésium	: 1.5 à 3 mg/l

Si nous comparons ces résultats avec ceux obtenus sur le ravineau expérimental de Tiassalé on constate que le calcium est en même proportion que le sodium alors que celui-ci n'était que faiblement représenté dans le ruissellement sous forêt. Le potassium est au contraire en proportion moindre.

- les sulfates ont une concentration qui passe de 1 à 3 mg/l en fin d'étiage pour retomber à 1 mg/l au cours de la crue.

- les phosphates varient peu, leur concentration est toujours inférieure à 1 mg/l.

CONCLUSION

Ces quelques données bien que succinctes permettent de saisir l'influence des trois facteurs : climatologie, géologie et végétation.

L'effet du climat se traduit surtout par la très grande différence entre les débits d'étiage et les débits de crue. Les exportations solides et solubles seront essentiellement tributaires de ces débits.

Aux quelques différences géologiques s'adjoint le rôle de la couverture végétale. La réunion de ces deux facteurs influence fortement les transports solides comme en témoigne le taux d'érosion, mais plus faiblement les transports en solution : les variations de la minéralisation de l'eau de l'amont à l'aval sont assez faibles.

BIBLIOGRAPHIE

- BERTHOIS L. - 1953 - Dosage pondéral des sédiments en suspension dans les eaux à forte turbidité.
Bull. Soc. Scient. Bret. T 28 Fasc. 1.2.3.4. pp. 7-12.
- BERTHOIS L. - 1965 - Techniques estuariennes
C D U Paris 100 l 144 pages 46 fig.
- BRAUDEAU G. - 1951 - L'étude et la mesure des débits solides en suspension Congrès A.I.H.S.Brux. 1951
Publ. A.I.H.S n° 34 pp. 117-123.
- DERRUAU M. - 1958 - Précis de géomorphologie
Masson Paris 484p.
- ERHART H. - 1956 - La genèse des sols en tant que phénomène géologique
Masson Ed. pp. 1 - 88.
- FOURNIER F. - 1960 - Débit solide des cours d'eau - Congrès U.G.G.I.Helsinki 1960.
Publ. A.I.H.S. n° 53 pp. 19-23.
- FOURNIER F. - 1965 - Mesure de l'érosion. Principes de base et incidence de l'instrumentation nouvelle sur l'établissement des réseaux de mesures.
A.I.H.S. Symposium de Quebec n° 67 pp. 343-355.
- FRIEDRICH W. - 1965 - Main principles of designing water temperature and water chemistry networks.
A.I.H.S. n° 67 pp.319-324.
- GUY H. P. - 1965 - Fluvial sediment measurement based on transport principles and network requirements.
A.I.H.S. n° 67 pp.295-409.
- KAZIMIERZ - 1956 - Essai d'évaluation de l'érosion des sols en Pologne - Congrès A.I.H.S. Toronto 1956. A.I.H.S. n° 43 pp.136-140.

- MANGIN J.Ph, LECOLLE J., MATHIEU Ph., MONNET Cl., PINTA M.,
SIRCOULON J. - 1966 - Géochimie des eaux naturelles ;
le transport en solution par un fleuve de Côte d'Ivoire
C.R. Acad. Sc. t. 262.
- HOOS BRUGGER M. - 1957- Le charriage et le débit solide en
suspension des cours d'eau de montagne
Congrès A.I.H.S. Toronto A.I.H.S. n° 43 pp. 203-231.
- O.R.S.T.O.M. - Service Hydrologique 1963 - Note hydrologique
sur le Bandama à Kossou.
- QUESNEL B. - 1964 - Traité d'hydraulique fluviale T. III. 0
Origine, transport et dépôt des matériaux constitutifs
des cours d'eau. Eyrolles 1964.
- ROCHE H. - 1963 - Hydrologie de surface.
ORSTOM Gauthier Villars 430p.
- RODIER J. - 1966 - L'analyse chimique et physico-chimique de
l'eau Dunod 412p.
- ROOSE E. - 1967 - Quelques exemples des effets de l'érosion
hydrique sur les cultures.
ORSTOM Centre d'Adiopodoumé. Laboratoire de Pédologie
18p.
- ROOSE E. - 1967 - Dix années de mesure de l'érosion et du
ruissellement au Sénégal.
Agronomie Tropicale n° 2 Fév. 1967 pp.123-152.
- SIRCOULON J. - 1967 - Bassin de l'Amitioro - Etude du ruissel-
lement et de ses facteurs conditionnels climatologi-
ques.
ORSTOM - Service Hydrologique. Centre d'Adiopodoumé.
- de la SOUCHERE P. - Etude pédologique d'un bassin versant tri-
butaire de la rivière Amitioro (Région de Tiassalé,
Côte d'Ivoire).
ORSTOM - Centre d'Adiopodoumé Laboratoire de Pédologie
- TIXERONT J., CORMARY Y. - 1965 -
Réseaux d'observation de l'érosion et du débit solide
des cours d'eau.
A.I.H.S. Symposium de Quebec n° 67 pp.379-393.

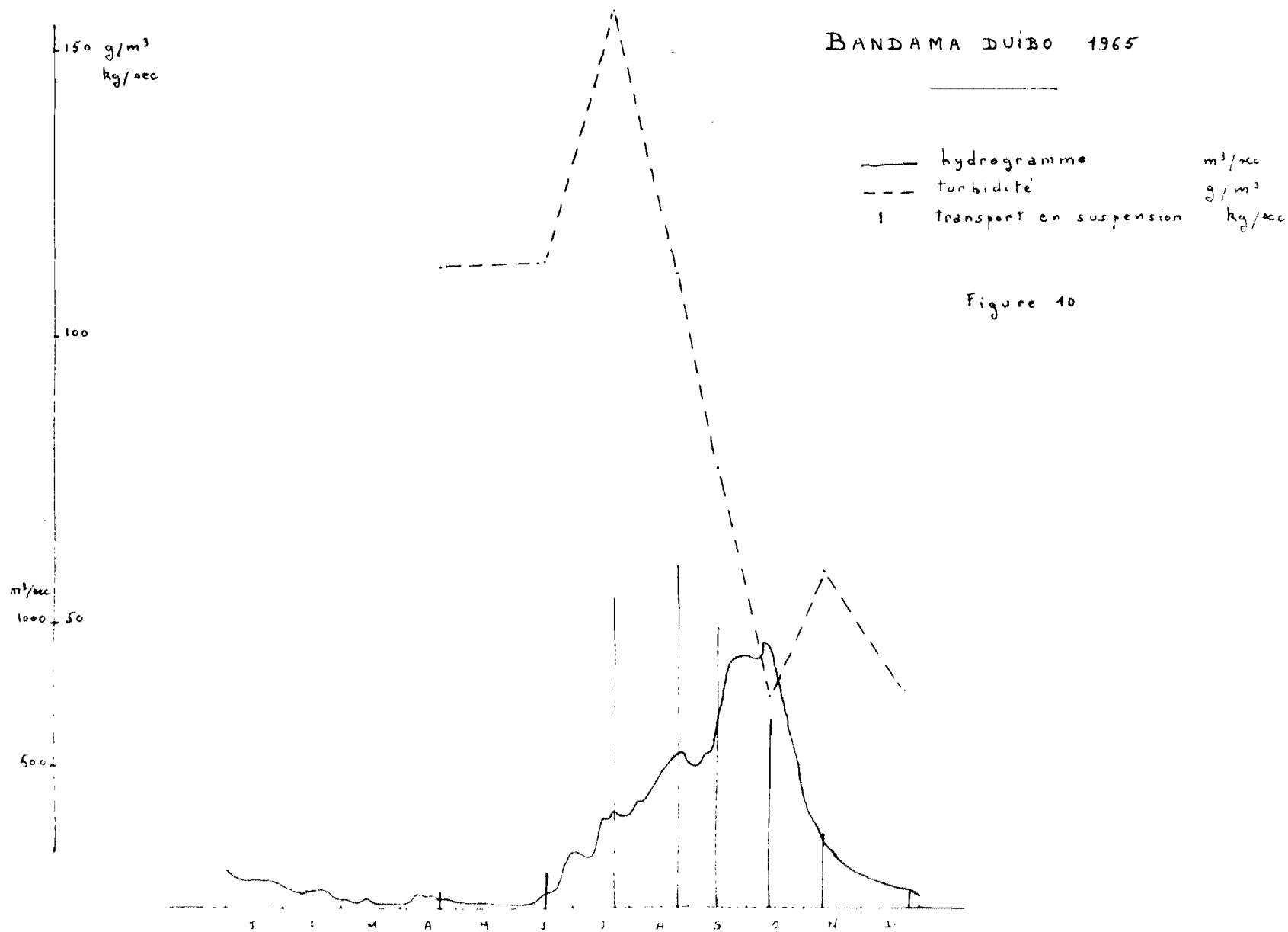
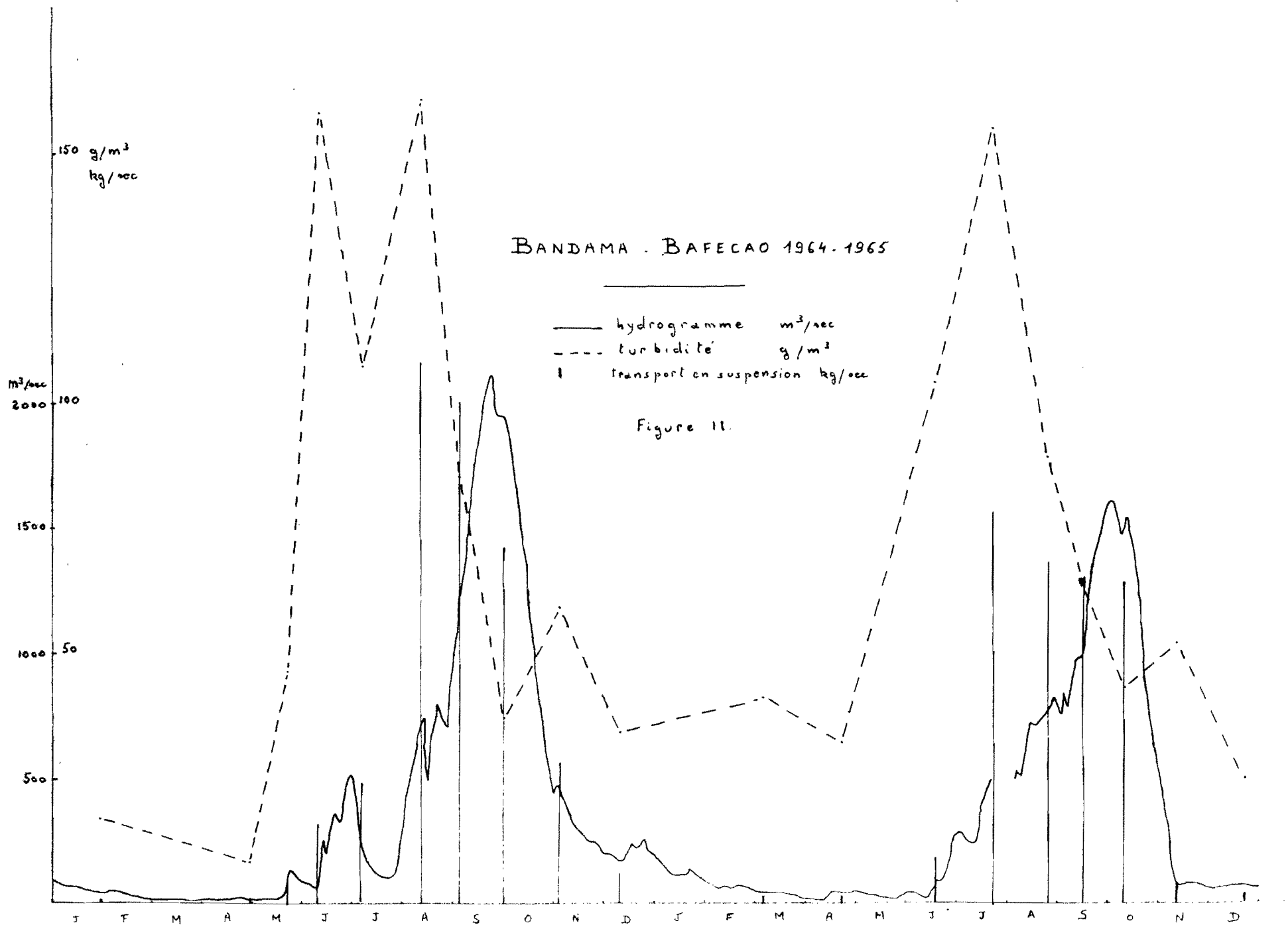
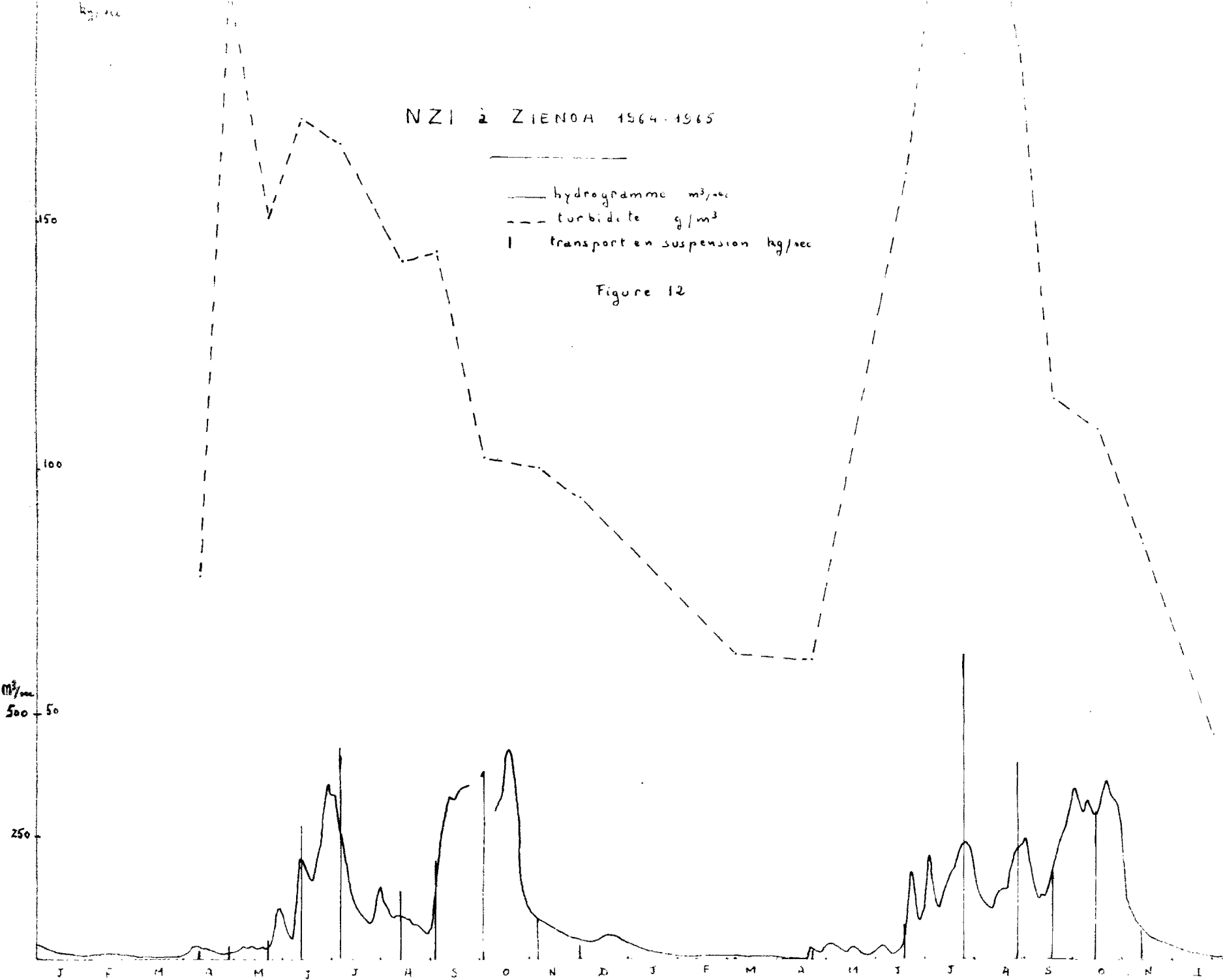


Figure 10

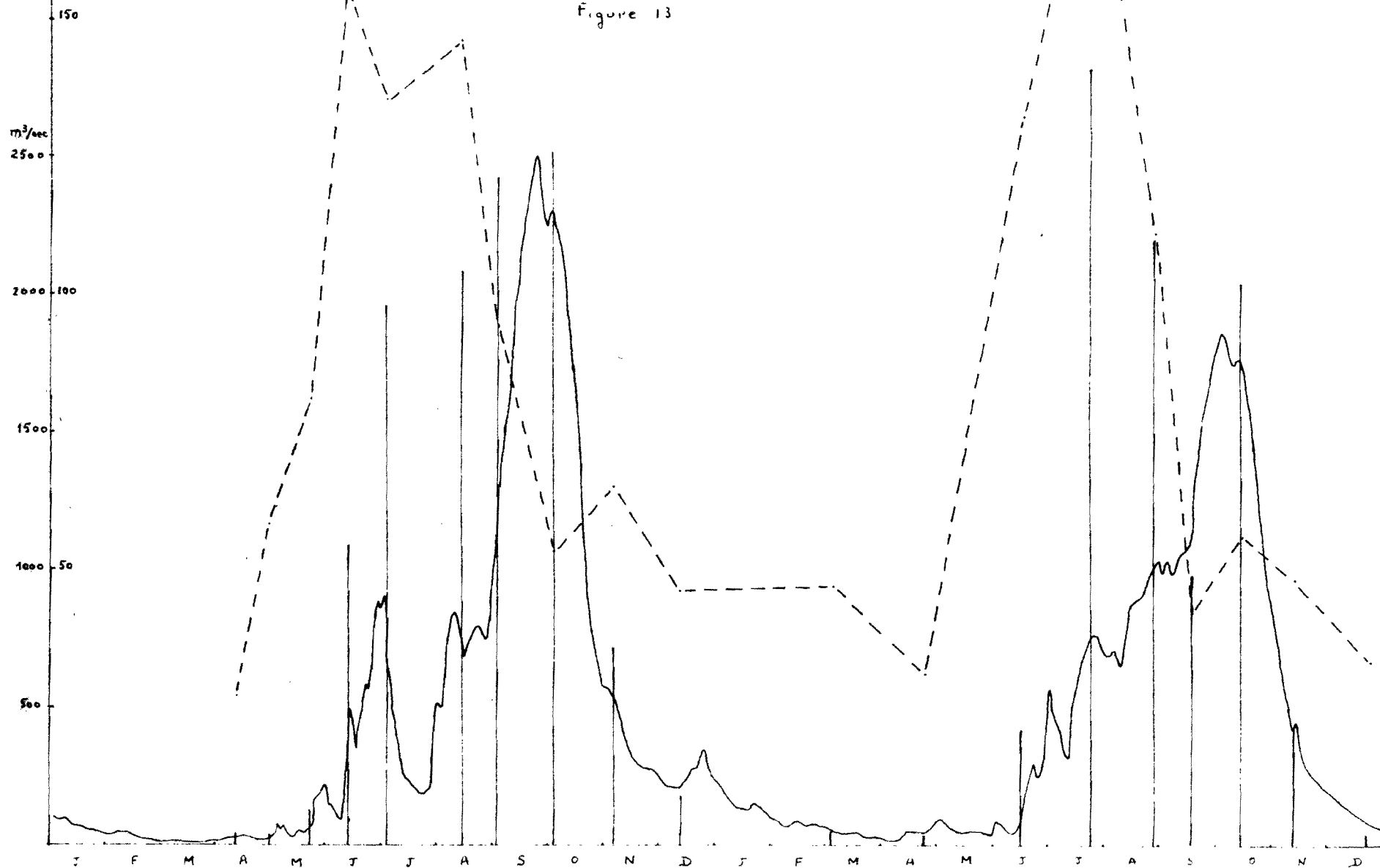


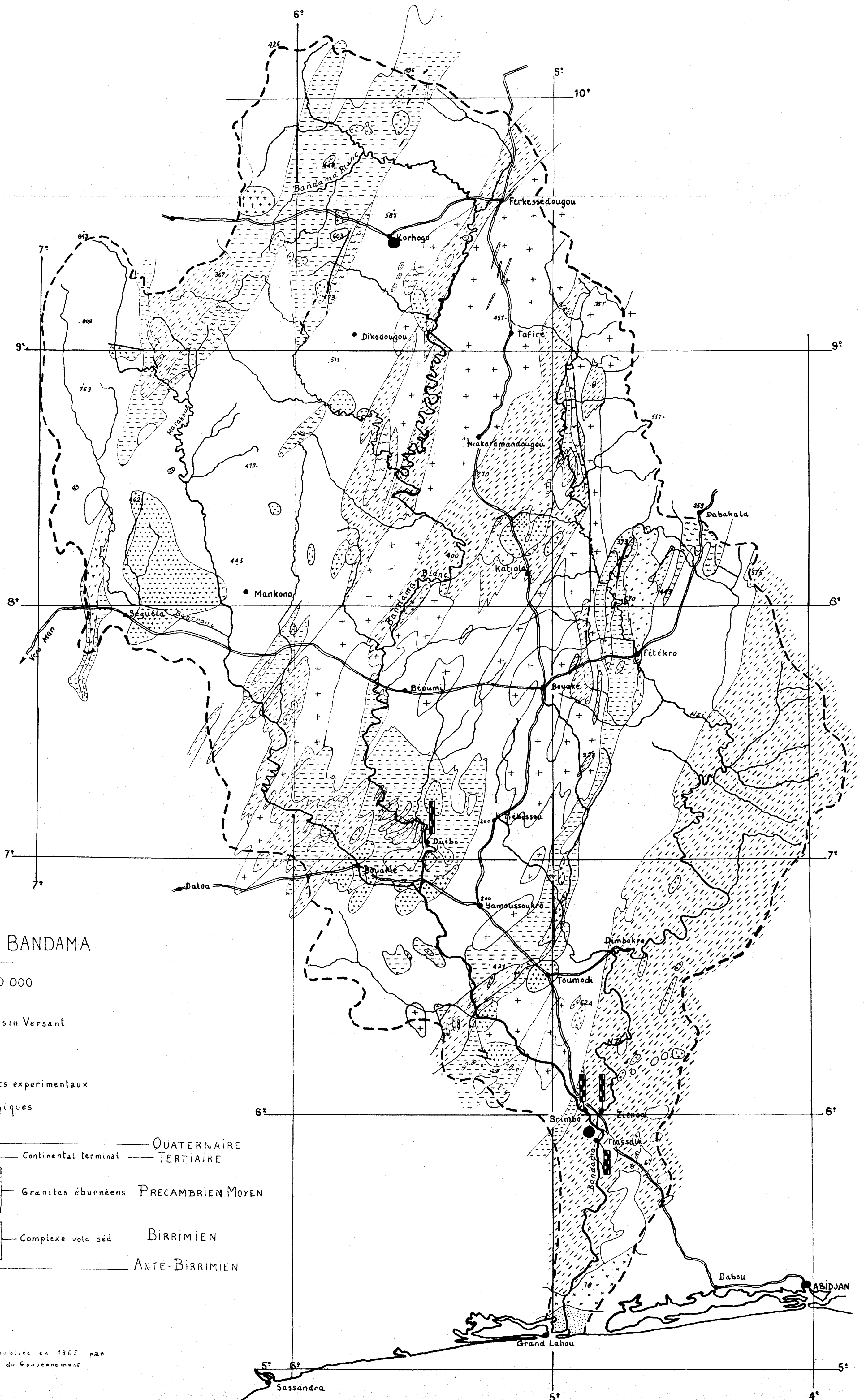


BANDAMA-TIASSALE 1964 1965

— hydrogramme m^3/sec
 --- turbidité g/m^3
 | transport en suspension kg/sec

Figure 13





Bassin versant du BANDAMA

ECHELLE : 1/1 000 000

— — — Limite du Bassin Versant



Stations Pluies



Bassins versants expérimentaux

— — — Contours géologiques

- | | | |
|--|---|--------------------------------------|
| | Alluvions pluviales et sédiments côtiers | QUATERNAIRE |
| | Sédiments sableux argileux et ferrugineux | Continental terminal — TERTIAIRE |
| | Granites homogènes discordants indifférenciés | Granites éburnéens PRECAMBRIEN MOYEN |
| | Granites concaveaux d'intragéosynclinaux | |
| | Granites des massifs médians rajeunés | |
| | Migmatites | Complexe volc. séd. BIRIMIEN |
| | Flysch éburnéen | |
| | Sédiments conglomérats indifférenciés | ANTE-BIRIMIEN |
| | Roches volcaniques | |
| | Granites et migmatites | |